

Редченко В.П.**ДИНАМІЧНИЙ КОЕФІЦІЄНТ АВТОДОРОЖНИХ МОСТІВ.
ПРОБЛЕМИ НАТУРНОГО ВИЗНАЧЕННЯ**

Всі мости призначені для пропуску рухомого навантаження, яке є одним з видів динамічного навантаження. Динамічну дію рухомого навантаження на мости, відповідно до діючих норм, враховують введенням в розрахунки “динамічного коефіцієнта”, який більший за одиницю. Натурне визначення вказаного коефіцієнта є однією з головних задач, які покладаються на динамічні випробування [1].

В сучасній нормативній термінології, яка стосується коливань та вібрацій, існує термін “коефіцієнт динамічного підсилення - відношення амплітуди реакції при вимушених коливаннях чи вібрації до певної постійної реакції, яка характерна для даного виду збудження” [2]. Саме цьому означенню і відповідає термін “динамічний коефіцієнт”, який традиційно вживається в практиці мостового проектування.

Сто років тому при проектуванні моста динамічний вплив рухомого навантаження кожен інженер враховував виходячи з власного досвіду. При цьому застосовували два типові підходи: зменшували допустимі напруження в матеріалах чи збільшували тимчасове навантаження (статично прикладене) на певний коефіцієнт більший від одиниці, який визначався на “...оснований общих соображений...”[3]. Саме останній підхід, який більш реально відображає фізичний процес динамічного навантаження, і ввійшов в подальшу практику. Теоретичні та практичні дослідження, які були виконані у більшості з розвинутих країн на початку минулого століття, дозволили спочатку прийти до визначення загального виразу динамічного коефіцієнту, як гіперболічної функції від довжини прольоту - (1), так і до нормативного його визначення.

$$1 + \mu = 1 + \frac{a}{b + cL} \quad (1)$$

де L - довжина прольоту; a , b , c - відповідні коефіцієнти.

Слід відмітити, що складність проведення досліджень в ті часи, як теоретичних так і практичних, призводили до дуже значних відхилень в пропонованих значеннях динамічних коефіцієнтів різними авторами. Пояснюється це тим, що теоретичні розрахунки виконувалися з певними спрощеннями, які вносили досить значні похибки, а натурні визначення динамічного коефіцієнту ускладнювалися недосконалістю приладів для динамічних випробувань та відсутністю єдиної методики.

В табл. 1 наведено формули для визначення динамічних коефіцієнтів металевих прогонових будов автодорожніх мостів за нормами різних років.

Таблиця 1

Рік введення	$1 + \mu$
1910	$1 + \frac{10}{20 + L}$
1928	$1 + \frac{26}{59 + 3L}$
1938	$1 + \frac{15}{37,5 + L}$
1984 (діючі норми [4])	$1 + \frac{15}{37,5 + L}$
2004 (проект)	$1 + \frac{12}{40 + L}$ (наближена формула, яка еквівалентна вказівкам норм)

Як видно з таблиці, формули визначення динамічного коефіцієнту з 1938 року і до наших днів практично залишаються незмінними. У вітчизняній літературі відсутні пояснення чому саме зазначені в цих формулах значення постійних коефіцієнтів отримали в свій час “перемогу”. Проф. *Стрелецький Н.С.* прямо вказує на те, що встановлені вони на базі досліджень американських вчених [5].

При складанні нормативних формул для визначення динамічного коефіцієнту інженери - проєктанти намагаються якомога більше спростити їх, при цьому просліджується тенденція

звести його до певного постійного коефіцієнта, значення якого б гарантувало врахування великої кількості різних факторів динамічної дії рухомого навантаження. Очевидно це правильно, оскільки виконання значно складніших розрахунків, які дають поправку в межах точності самих розрахунків, є не раціональним.

В той же час, саме з нормативними значеннями динамічних коефіцієнтів слід порівнювати фактичні їх значення, які встановлені за результатами динамічних випробувань. На шляху до практичного втілення простого на перший погляд завдання, стикаємося з цілим рядом труднощів. В першу чергу, як це не дивно, до цього часу не існує єдиної методики визначення динамічного коефіцієнту для прогонових будов автодорожніх мостів та алгоритму його порівняння з нормативним коефіцієнтом. Кожен виконавець випробувань керується власним досвідом з цього питання, або ж повторює методику попереднього виконавця. При цьому велика різноманітність умов проведення випробувань не дозволяє провести достовірні порівняння одних результатів з іншими, не говорячи вже про екстраполяцію натурних результатів до якихось нормативних величин.

Складність визначення натурального динамічного коефіцієнту та його порівняння з нормативною характеристикою саме для конструкцій автодорожнього мосту пов'язана з наявністю великої кількості факторів його залежності від характеру навантаження, параметрів прогонової будови, типу реакції, що реєструється, та умов проведення випробувань. Перечислимо найбільш вагомі з них:

- швидкість руху навантаження;
- загальна маса навантаження та маса її підресореної частини;
- розміри та тип навантаження (кількість осей, відстань між ними);
- положення навантаження на прогоновій будові (смуга руху та їх кількість);
- жорсткість прогонової будови та форма коливань при дії навантаження;
- загальна маса прогонової будови та її розподілення;
- характер розподілу зусиль між головними балками;
- демпферні властивості прогонової будови;

- положення перерізу, для якого реєструється динамічна реакція та тип реакції (загальні деформації чи місцеві);
- мостове полотно (конструкція деформаційних швів, наявність вибоїн чи напливів);
- планово - профільне положення мосту.

Розглянемо вплив цих факторів більш детально.

Швидкість та маса навантаження. Загальна маса та жорсткість прогонової будови. Вплив цих факторів на конструкції мостів вивчався багатьма інженерами. Точне розв'язання вказаної задачі пов'язане з дослідженням диференційних рівнянь зі змінними коефіцієнтами і є дуже складним. Для початкового розуміння впливу швидкості та маси навантаження, яке рухається по балці (модель моста), звернемося до спрощеного розв'язання, яке в різних інтерпретаціях наведене в роботах ряду авторів [6], [7]. В спрощеному варіанті вплив швидкості та маси рухомого навантаження розглядається окремо, при цьому навантаження замінюється зосередженою силою. В першому наближенні нехтують масою навантаження в порівнянні з масою балки, в другому - нехтують масою балки. Після певних перетворень виразів для динамічної реакції балки на рухоме навантаження, які отримані за обома моделями, маємо наступні вирази для динамічних коефіцієнтів прогину в середині прольоту балки постійного перерізу без врахування сил опору.

Для випадку, коли маса навантаження значно менша маси балки, маємо

$$1 + \mu = \frac{2Lf}{2Lf - v} \quad (2)$$

Для випадку, коли маса навантаження значно більша маси балки, маємо

$$1 + \mu = 1 + \frac{mv^2L}{3EI} \quad (3)$$

де: m - маса навантаження; v - швидкість руху навантаження; f - частота власних коливань балки; L - довжина прольоту балки; EI - жорсткість балки.

Для переважної більшості прогонових будов автодорожніх мостів, які експлуатують в Україні, добуток Lf є майже стала

величина, яка знаходиться в межах 80...120 (дані авторських випробувань більш ніж 100 прогонових будов прольотами від 8м до 147м). Таким чином для випадку, коли масою навантаження нехтуємо, динамічний коефіцієнт залежить лише від швидкості руху навантаження та не залежить від довжини прольоту. З виразу (2) можна бачити, що зі збільшенням швидкості динамічний коефіцієнт асимптотично зростає (гіпербола) при наближенні до так званої “*критичної швидкості*” (близько 600 км/год). Насправді ж, більш точний розв’язок для максимальних значень динамічного коефіцієнту при наближенні швидкості до критичної, коли максимальна динамічна реакція вже не відповідає положенню навантаження для максимальної статичної реакції має невизначеність виду $0/0$. Розкриття невизначеності дає максимальне значення динамічного коефіцієнту 1,5 (при цьому сила вже “з’їжджає” з прольоту) [6], а з врахуванням сил тертя, це значення буде ще меншим. Однак, слід зауважити, що в разі послідовного руху декількох навантажень з критичною швидкістю, коли їх динамічний вплив складається, значення динамічного коефіцієнту може значно зрости.

Аналізуючи вираз (3) бачимо, що значення динамічного коефіцієнту пропорційне кінетичній енергії навантаження. Для одного й того ж навантаження та стабільній його швидкості динамічний коефіцієнт зменшується при зростанні довжини прольоту, подібно як це наведено у виразі (1). Звісно слід пам’ятати, що при зростанні довжини прольоту балки зростає її маса, а отже вираз (3) стає дуже неточним і з якогось моменту настає черга користуватися виразом (2).

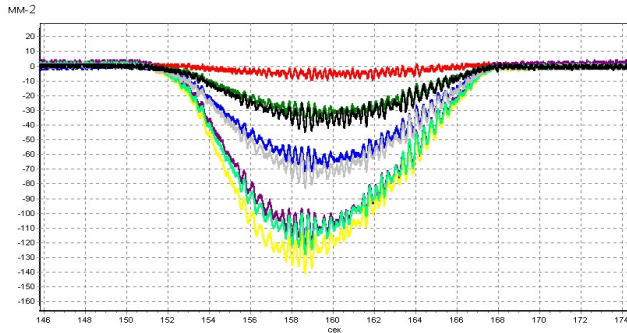
Розміри та схема навантаження. Реальне навантаження для автодорожніх мостів - це як правило певна послідовність рухомих осей, частина яких має чітко визначену послідовність (розміри бази для одного автомобіля) інша частина може бути визначена лише з певною ймовірністю (послідовність автомобілів з різним інтервалом). Розглядаючи рух однієї сили по балці, коли на криву статичного прогину накладаються коливання балки, можна помітити, що максимальний динамічний коефіцієнт буде у випадку, коли фаза динамічної добавки співпадає з фазою статичної реакції в її максимумі. При швидкостях значно менших за критичну, означеній вимозі буде відповідати рух сили з рядом

“пікових” швидкостей, які з певним наближенням можна визначити за наступною формулою:

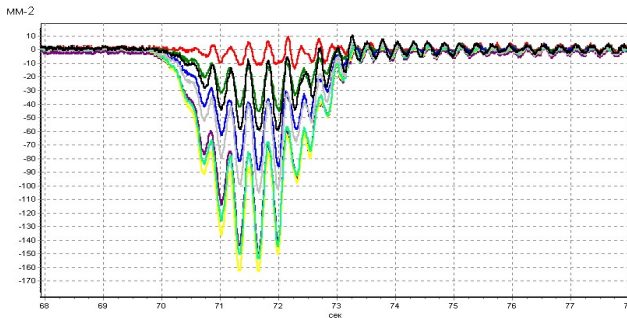
$$v = \frac{Lf}{2(0,75 + n)} \approx \frac{40 \dots 60}{0,75 + n} (\text{м/сек}); \quad (4)$$

де n - ціле число.

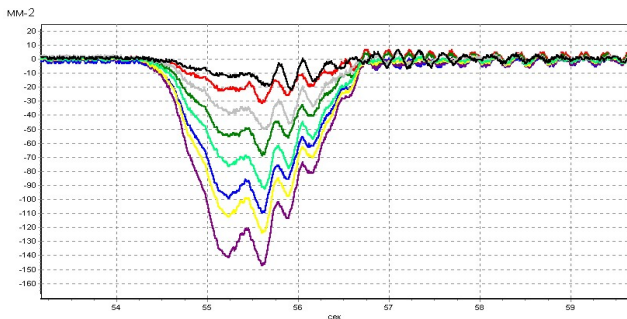
Враховуючи, що реальний автомобіль має як мінімум дві осі динамічна дія яких складається, то розмір бази автомобіля також буде одним з визначальних чинників для “пікових” швидкостей конкретного навантаження. Заїзд чергової осі в момент, коли її динамічний вплив підсилює вже діючу динамічну реакцію збільшує значення динамічного коефіцієнту. Саме цим і пояснюється те, що для багатьох споруд при випробуваннях динамічні коефіцієнти на швидкостях близько 40...45 км/год більші ніж при швидкостях 55...60 км/год.



а



б

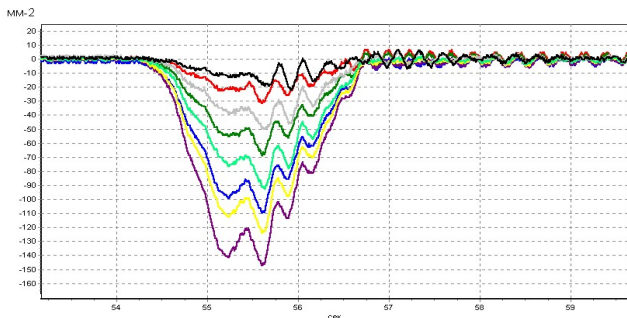


в

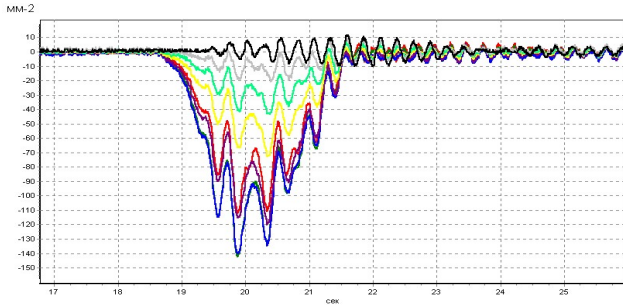
*Рисунок 1 - Діаграми прогинів балок прогонової будови при проїзді вантажівки зі швидкістю:
а) 8км/год; б)40 км/год; в) 55 км/год.*

На рис. 1 представлені діаграми прогинів головних балок залізобетонної прогонової будови довжиною 33м. при проїзді одного й того ж навантаження з різними швидкостями. Як бачимо з діаграм, значення динамічного коефіцієнту максимальне при швидкості руху навантаження 40 км/год.

Положення навантаження на прогоновій будові. Характер розподілу зусиль між головними балками. Для прогонової будови, яка має в поперечнику декілька головних балок, динамічний коефіцієнт визначений для різних балок буде різний. Балки, які мають менший статичний прогин, будуть мати більше значення динамічного коефіцієнту, оскільки динамічна добавка присутня навіть для балки, статична реакція якої близька до нуля - відповідно її динамічний коефіцієнт близький до безкінечності. Звичайно вказаний випадок цікавий лише з теоретичного погляду, оскільки на практиці нас цікавлять максимальні значення реакції.



а



б

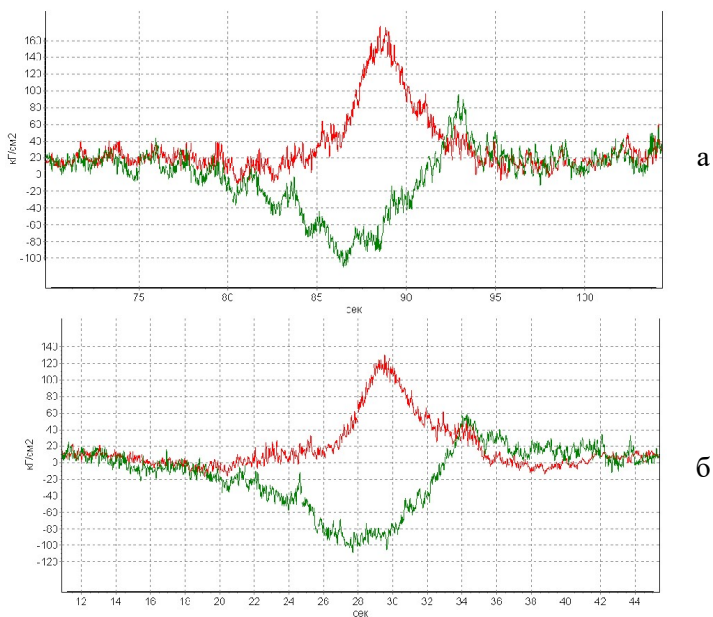
*Рисунок 2 - Діаграми прогинів балок прогонової будови при проїзді вантажівки по:
а) середній смузі; б) крайній смузі.*

В той же час, в залежності від смуги руху навантаження, максимальний динамічний коефіцієнт також буде різний (при незмінному навантаженні та швидкості руху). На рис. 2 представлені діаграми прогинів головних балок прогонової будови довжиною 33м. для випадків проїзду навантаження по різних смугам проїжджої частини. При синхронному русі навантаження одночасно по декільком смугам динамічний коефіцієнт для балки з максимальною реакцією зростає, оскільки до максимальної реакції з одної смуги додається менша статична реакція з іншої смуги та її відносно більша динамічна добавка. Визначальну роль при цьому відіграє характер розподілу зусиль між головними балками, а в певних випадках ще й розподіл маси в поперечному перерізі прогонової будови.

Форма коливань прогонової будови. Положення перерізу та тип контрольованої реакції. Оскільки величина динамічної добавки залежить від кінетичної енергії навантаження, то розглядаючи енергію коливального процесу, можна зробити висновок, що при однаковій величині переданої енергії амплітуди коливань будуть більшими для форм коливань з меншими частотами. Найбільші динамічні коефіцієнти будуть для випадків, коли навантаження збуджує першу форму коливань (найменша частота). Найбільш суттєво цей фактор відіграє роль для прогонових будов з великою довжиною прольоту, як правило це висячі, вантові або ж рамні типи прогонових будов.

На рис. 3 представлено діаграми напружень головної балки рамної прогонової будови повною довжиною 178 м для перерізу

в середині прольоту та біля опорного вузла. Для даного типу прогонової будови перша форма коливань є кососиметричною відносно середини прольоту, тому для перерізу в середині прольоту динамічна добавка при збудженні першої форми коливань не відіграє суттєвої ролі на відміну від перерізу поблизу вузла рами, де при збудженні першої форми коливань добре видно зростання динамічного коефіцієнту. Слід підкреслити, що в разі вимірювання загальних прогинів конструкції в вертикальній площині, аналогічна динамічна дія не реєструється, оскільки за першою формою коливань загальні деформації мають переважно горизонтально - поздовжній напрямок. Таким чином, для визначення максимальних значень динамічного коефіцієнту, положення перерізу та тип реакції слід вибирати з врахуванням особливостей конструкції та форм її власних коливань.



*Рисунок 3 - Діаграми напружень:
 а) при збудженні першої форми коливань;
 б) без збудження першої форми.*

Демпферні властивості конструкції. Умови проїзду транспорту. При русі навантаження по прогоновій будові, динамічні реакції останньої тим більші чим менші сили опору, як внутрішні так і зовнішні. Саме завдяки силам опору явище резонансу, навіть при зближенні власних та збуджуючих частот, має певні обмеження та не викликає катастрофічних наслідків. Як правило, демпферні властивості прогонової будови залежать від матеріалу, з якого виконані конструкції, типу опорних частин та типу деформаційних швів. Сили опору в деформаційних швах та опорних частинах дуже залежать від природи тертя, яке спостерігається, - тертя спокою чи тертя ковзання, що в свою чергу залежить від амплітуди коливань, а отже і від ваги навантаження.

Планово-профільні умови проїзду по мосту також впливають на величину динамічної дії навантаження. Наявність кривої в плані чи в профілі дещо змінює характер дії рухомого навантаження на прогонову споруду, особливо це помітно при наявності на в'їздах так званих "трамплінів" - переломі в профілі на малій довжині. Проїзд навантаження по такій ділянці викликає додаткові вертикальні прискорення, що збуджує власні коливання підресореної маси навантаження і її загальну динамічну дію на прогонову будову. На рис.4 представлено діаграми динамічних прогинів головних балок у трьох прольотах шляхопроводу естакадного типу при проїзді одиночної вантажівки. Прогонові будови однотипні, зареєстровані прогини відносяться до одних і тих же балок в поперечнику, прогонові будови розташовані послідовно, отже можна вважати, що швидкість руху навантаження однакова, смуга руху навантаження також незмінна. В даному випадку маємо наглядну відмінність динамічних коефіцієнтів лише в залежності від умов проїзду та демпферних властивостей кожної прогонової будови.

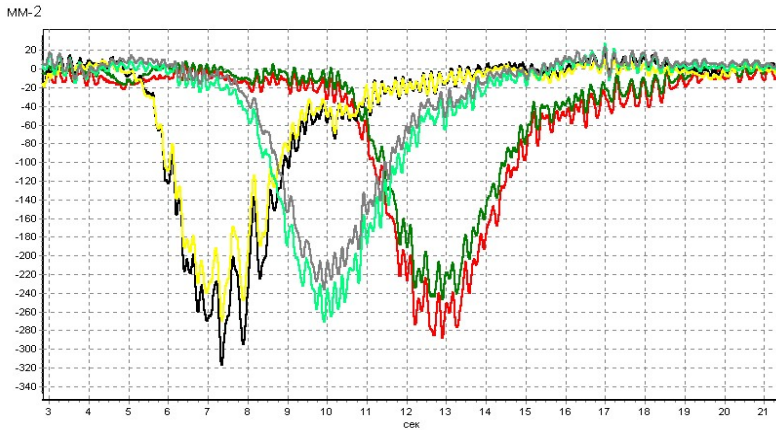


Рисунок4 - Діаграми прогинів головних балок прогонових будов естакади при проїзді вантажівки.

Як бачимо, лише за рахунок різниці в демпферних властивостях динамічна добавка відрізняється майже в два рази, а динамічний коефіцієнт має значення в межах від 1,1 до 1,2.

Висновки

Для правильного визначення натурального динамічного коефіцієнта прогонових будов автодорожніх мостів за результатами динамічних випробувань, слід розробити та затвердити єдину методику, яка б чітко вказувала, яким чином враховуються численні фактори впливу. Методика повинна забезпечити загальний об'єктивний підхід при визначенні динамічного коефіцієнту за результатами випробувань та встановити чіткі алгоритми його порівняння з нормативними значеннями. Без виконання цієї програми мінімуму, вимога діючих норм [1], щодо визначення динамічного коефіцієнту при проведенні динамічних випробувань, веде до ряду невизначеностей.

Література

1. **ДБН В.2.3-6-2002.** “Мости та труби. Обстеження та випробування”, К., Держбуд України, 2002р.
2. **ГОСТ 24346-80.** Вибрация. Термины и определения.
3. **Передерий Г.П.** Курс мостов, ч.1. - М.:1931 - 738с.
4. **СНиП 2.05.03-84*.** “Мосты и трубы”.
5. **Стрелецкий Н.С.** Курс металлических конструкций, ч.3. - М.:Госстройиздат, 1944 - 499с.
6. **Тимошенко С.П., Янг Д.Х., Уивер У.** Колебания в инженерном деле. М.: Машиностроение, 1985 - 472с.
7. **Крылов А.Н.** Избранные труды. Л.: изд АН СССР, 1958 - с.288.